

## 直流减压层流氩等离子体射流的温度测量

孟显, 郭志颖, 潘文霞, 吴承康

中国科学院力学研究所 北京 100190

在低于大气压条件下产生的减压热等离子体射流仍然具有较高的温度和能流密度, 已经有几十年的材料工艺应用历史[1, 2], 但是对减压热等离子体射流的参数诊断、特别是对其可能偏离局域热力学平衡的特性研究还远未深入和系统。本文采用玻尔兹曼图表法及双静电探针方法, 对以纯氩为工质的减压层流热等离子体射流的激发温度及电子温度进行了测量。

产生层流氩等离子体射流的工作参数为: 气流量  $1.25 \times 10^{-4}$  kg/s, 弧电流 80-100 A, 真空室压力 170-2000 Pa。玻尔兹曼图表法采用 6 条分别为 675.28 nm, 687.13 nm, 696.54 nm, 706.72 nm, 738.40 nm, 750.39 nm 的氩原子谱线。光谱仪焦距为 550 mm, 探测器为具有精确曝光时间的 ICCD, 成像光路中的透镜焦距为 300 mm, 光纤芯径为 0.2 mm, 物像比为 1:1。双静电探针系统由双静电探针、氮化硼支座、偏压电源、采样电阻和数据采集系统组成。探针由直径 0.3 mm 的钨丝制成, 裸露在等离子体中的长度为 2 mm, 其余部分套装在内径 0.5 mm、外径 1 mm、长度 35 mm 的氧化铝管中。陶瓷管的中心距为 2 mm, 用耐高温无机胶固定于氮化硼支座。偏压电源输出为 -10 V ~ +10 V, 阻值为  $10 \Omega$  的采样电阻串接于探针回路。以通道间相互隔离的数字存储示波器记录采样电阻两端及偏压电源的输出电压。

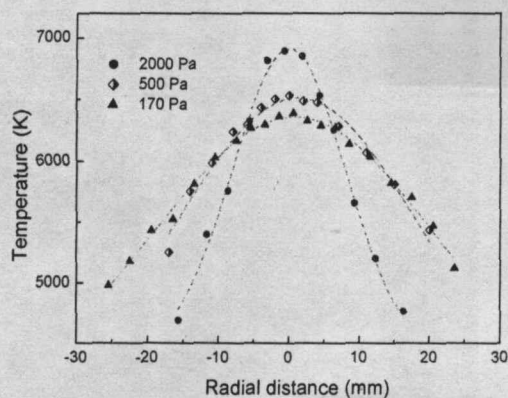


图 1 激发温度的径向分布 (距发生器出口 10 mm, 弧电流 80 A)。

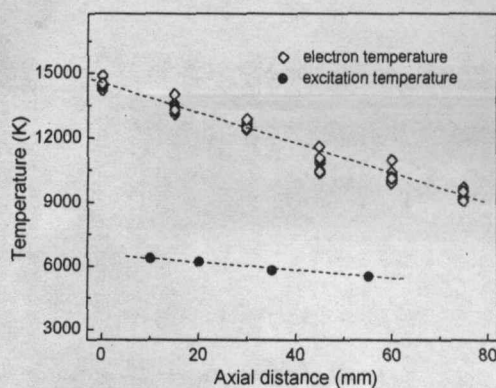


图 2 电子温度及激发温度沿射流轴向距离的变化 (真空室压力 170 Pa, 弧电流 80 A)。

图 1 为玻尔兹曼图表法得到的不同真空室压力条件下, 层流等离子体射流激发温度的径向分布。测量截面距离发生器出口 10 mm, 弧电流为 80 A。可见, 层流射流中心的激发温度以及径向梯度都随真空室压力的增加而增加。真空室压力为 170 Pa 时, 中心最高值为 6400 K, 平均径向梯度为 55 K/mm; 而当真空室压力增加到 2000 Pa 时, 中心最高温度增加到 6900 K, 平均径向梯度增大到 130 K/mm。图 2 比较了在真空室压力为 170 Pa 以及弧电流为 80 A 的条件下, 层流射流中心的电子温度和激发温度沿轴向距离的变化。两种温度都随轴向距离的增加而减小, 激发温度远低于同条件下的电子温度测量值。从图中也注意到, 电子温度在相同轴向距离条件下的各次测量值有较大的偏差。造成这

个结果的主要原因,是产生等离子体射流的电源为全波整流电源,其输出中含有 300 Hz 的交流波动,导致电弧功率的波动[3]。而每个激发温度的测量值是多条谱线各自在一定时间内积分强度经处理后的平均结果,不反映射流波动的瞬时效应。在发生器出口处,测得的电子温度平均值约为 14500 K,当轴向距离增加到 75 mm 时,电子温度的平均值降低到 9300 K,平均变化梯度约为 70 K/mm。激发温度沿轴向的平均变化梯度约为 20 K/mm,低于其径向梯度,表明层流射流可在较长的轴向范围内保持高的温度及能流密度。

本文的研究结果表明,在实验参数范围内,射流中心的激发温度及径向梯度随真空室压力而增加;在相同的实验条件下,电子温度远高于激发温度,表明减压条件下的等离子体射流明显偏离了局域热力学平衡状态。

致谢:本文工作得到了国家自然科学基金项目的资助(Nos. 10805066, 10621202)。

#### 参考文献:

- [1] T. Yoshida and M. Kambara, Super high rate deposition of homo- and hetero- epitaxial silicon thick films by meso-plasma CVD. *High Temperature Material Processes*, 2007, Vol. 211(1): 103.
- [2] R. Furukawa, H. Uyama and O. Matsumoto, Diamond deposition with plasma jet at reduced pressure, *IEEE Transactions on Plasma Science*, 1990, Vol. 18(6): 930.
- [3] W. X. Pan, X. Meng and C. K. Wu, Arc Voltage Fluctuation in DC Laminar and Turbulent Plasma jets Generation. *Plasma Science & Technology*, 2006, Vol. 8(4): 416.